

〈논 문〉

## Incremental DP에 의한 홍수시 댐군의 연계 운영

### An Optimal Operation of Multi-Reservoirs for Flood Control by Incremental DP

이 재 형\* 이 길 성\*\* 정 동 국\*\*\*

LEE, Jae Hyung LEE, Kil Seong JEONG, Dong Kug

ABSTRACT □ An optimal operation model for flood control of multi-reservoirs, Hwacheon and Soyanggang, located in the north Han River basin is developed by using the Incremental DP. The objective function is to minimize the peak flow at the confluence point, of Euam dam, and the hydraulic and hydrologic constraints are established by considering the related laws as to the operation of dam in flood season, each reservoir and channel characteristics. In particular, the final elevations of each reservoir are induced to the conservation pool level in order to prepare for the secondary flood. In addition, the results of this model, simulation results and the single reservoir operation by DP are compared in terms of control and utility efficiencies, and also the peak flows at the confluence point for floods with various return periods are compared with the results of simulation using feedback control. As the results, the control and utility efficiencies are more or less low in contrast with the results of simulation and the single reservoir operation by DP, and the peak flows at confluence point are high because of terminal condition of reservoir storage.

要旨: 북한강 수계에 위치한 화천댐과 소양강댐을 홍수시 연계 운영을 위하여 Incremental DP를 사용하여 최적운영모형을 개발하였다. 목적함수로는 의암댐 합류점의 첨두 유량을 최소화하는 것으로 하였으며, 수리-수문학적 제약조건은 홍수시 댐조작에 관한 법령, 각 댐 및 하도특성을 고려하여 설정하였다. 특히, 2차 홍수에 대비하여 홍수가 끝나는 시점의 수위가 제한수위가 되도록 하였다. 또한 Incremental DP 모형의 운영결과와 Simulation 및 DP에 의한 단일댐 운영결과를 조절률과 이용률의 관점에서 비교하였고, 합류점의 첨두유량을 Feedback Loop를 이용한 Simulation 결과와 비교하였다. 운영결과 조절률과 이용률이 Simulation 및 DP에 의한 단일댐 운영결과보다 다소 낮게 나타났고, 합류점 유량이 Feedback Loop에 의한 결과보다 크게 나타났는데 이는 홍수말기의 수위에 관한 제약조건 때문이다.

#### 1. 序 論

하절기에 집중적으로 내리는 강우에 의하여 과거 한강유역은 막대한 재정적 손실과 인명피해를 감수하여야만 하였다. 그러나 최근에 들어 하천 중상류에 댐을

건설하고 하천정비사업을 실시하여 수류에 의한 피해를 막고 수자원을 효율적으로 이용하기 위한 노력들이 이루어지고 있다. 이러한 구조적인 사업과 더불어 병행되어야 할 것은 구조물의 이상적인 운영방안에 대한 연구이다. 일반적으로 댐의 운영방안은 조작기간 단

\* (株) 大宇 종합설계실 土木설계부

\*\* 서울대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 한남대학교 토목공학과 조교수

위의 측면에서 분류하면 용수공급 및 발전등의 이수관점에서의 장기운영방안(Long-Term Operation)과 홍수시 치수관점에서의 단기운영방안(Short-Term Operation)으로 대별할 수 있고, 구성면에서는 단일댐 운영방안(Single Reservoir Operation)과 댐군의 연계 운영방안(Multi-Reservoir Operation)으로 분류할 수 있다. 현재 한강유역에는 본류에 팔당댐이 위치하고 있으며 북한강에는 하류로부터 청평, 의암, 춘천 및 화천댐이 있고 지류인 소양강에 소양강댐이 있다. 또한 남한강에는 지류인 달천에 괴산댐이 있으며 최근에 충주 다목적댐이 완공되어 홍수시 한강유역의 수위조절에 큰 기여를 하고있다. 본 논문은 차후 한강유역 댐군의 연계운영을 위한 기초적인 연구로서 북한강 수계의 화천댐과 소양강댐을 최적화 기법인 Incremental DP를 사용하여 연계 운영함으로써 최적 운영방안을 도출하는데 그 목적을 두고있다.

2. 홍수시 댐 운영방안

2-1 방류기준 설정 (건설부, 1985)

- a. 홍수조절만의 관점-자연조절방법, 일정량 조절 방법, 일정률 조절방법, 일정률-일정량 조절방법 등이 있다.
- b. 홍수조절 및 수량보전의 관점 - Automatic ROM, Rigid ROM 및 Technical ROM, Linear Decision ROM(Lee and Jeong, 1986) 등이 있다.

2-1 방류기준 설정 (건설부, 1985)

- a. 홍수조절만의 관점-자연조절방법, 일정량 조절 방법, 일정률 조절방법, 일정률 - 일정량 조절방법 등이 있다.
- b. 홍수조절 및 수량보전의 관점 - Automatic ROM, Rigid ROM 및 Technical ROM, Linear Decision ROM(Lee and Jeong, 1986) 등이 있다.

2-2 홍수시 저수지 용량의 조절방법

- a. 제한수위방식 - 홍수기에 일정한 제한수위를 설정하고 그 수위 이상의 저류를 제한하는 방식으

로써 치수, 이수 양면에서 가장 안전도가 높다.

- b. 예비방류방식 - 평상시에 만수위까지 이수목적에 사용하고 홍수의 위험이 발생하였을때 방류하여 저수위를 낮춤으로써 홍수조절용량을 확보한다.
- c. 기타 방법 - 차등제한 수위방식, Surchage 수위의 설정

2-3 최적화 기법(Optimization Techniques)에 의한 홍수조절

최적화 기법은 비선형 계획법(Nonlinear Programming), 선형 계획법 (Linear Programming) 및 동적 계획법(Dynamic Programming)으로 대별된다. 비선형 계획법은 최적화 과정이 다른 기법에 비해 느리고 유입량이 추계학적 특성을 고려하기 어렵기 때문에 저수지 조작에 사용된 예가 드물다. 그러나 다른 기법들에 대한 수학적 해석의 근간을 제공하는데 그 의의를 갖고있다. 선형계획법은 수자원 분야에 가장 널리 사용되는 최적화기법으로서 목적 함수 및 제약 조건의 변수들이 선형관계일때 효과적으로 적용될 수 있다. 또한 범용 Package(예를들면 IMSL : ZX0LP, ZX3LP, ZX4LP 등)가 잘 개발되어 있어 문제가 수식화 되면 쉽게 문제를 해결할 수 있다. 그러나 댐군의 단기연계운영과 같은 최적화 문제는 제약조건 변수들 간에 비선형성이 존재하므로 선형계획법을 적용하기 위해서는 선형화에 대한 연구가 필요하며 유입량의 추계학적 특성을 고려하기 힘든 어려움이 있다. 동적 계획법은 상태변수와 단계의 수가 증가함에 따라 컴퓨터의 용량을 많이 차지하고 계산시간이 오래걸리는 차원 문제가 생겨 댐군의 연계운영에 적용하는데는 어려움이 따르나 원래의 제약조건을 선형화시키지 않고 그대로 사용할 수 있으며 유입량의 추계학적 특성을 다른 방법에 비해 쉽게 고려할 수 있는 강점이 있다.

2-3-1 선형 계획법(Linear Programming)

댐의 장기운영에 대하여 이 기법을 적용한 연구(Yeh, 1985)는 많이 이루어졌으나 홍수조절 목적의 단기 운영에 관한 연구는 극히 드물다. Windsor(1973)는

홍수시 주요 피해지역에서의 손실을 최소화시키는 목적함수아래 복합댐을 조작하는 Recursive LP 모형을 개발하였으며 목적함수와 제약조건식을 선형화 시키기 위하여 Piecewise Linearization Technique을 이용하였다. 이 모형을 적용하기 위해서는 Damage Center를 설정하여 침두유량에 따른 피해액 자료를 만드는 것이 요망된다. 또한 JanMärien(1980)은 정확한 홍수 예측하에 홍수가 시작되기 전에 방류를 최대화시키는 목적함수를 사용하였다.

2-3-2 동적 계획법(Dynamic Programming)

이 기법을 사용한 연구는 상당히 많이 이루어졌는데 주로 댐의 장기운영에 관한 연구에 집중되어졌고 단기 운영에 관한 연구는 국내외에서 몇몇 사람에 의하여 수행되어졌다(김치홍, 1972; 오영민과 이길성, 1986; Jamieson and Wilkinson, 1972; Shults and Plate, 1976). 또한 차원문제(Curse of Dimensionality)를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구들의 기본적인 개념은 고려되는 전체시스템을 부분시스템으로 나누어 부분시스템의 최적해를 구하는 분해기법(Decomposition)과 전체 최적해를 구하기 위하여 반복적으로 부분시스템을 조절하는 반복기법(Iteration)이 그 근간을 이루고 있다. Incremental DP (IDP)는 상태변수에 대한 증분 개념을 도입하여 매 단계에서 상태변수가 취할 수 있는 가능영역의 부분집합만을 고려하고 점진적으로 해를 개선하여 최적해에 도달하도록 하는 방법으로서, Successive Approximation을 함께 사용(IDPSA)하면 6차원의 문제까지 해결이 가능하다(Trott and Yeh, 1973). Discrete Differential DP(DDDP)는 IDP의 확장으로서 매 단계에서 초기해 근방의 값을 3개 이상 고려할 수 있다(Heidari et al., 1971). IDP, IDPSA 및 DDDP는 순환방정식을 푸는데 필요한 컴퓨터의 기억장소를 상당히 줄여준다. 그러나 최적해에 도달하는 수렴속도가 느리고 최적해에 대한 수렴성을 일반적으로 증명하기가 어렵다는 점이 단점으로 지적되고 있다(Trott and Yeh, 1973). Linear Quadratic Programming(LQP)은 시스템 방정식이 선형이고 목적함수가 2차(Quadratic)인 경우

이 문제에 대한 Riccati 방정식을 풀어 해석적인 해를 유도할 수가 있고 Feedback Loop를 적용하여 제약조건을 고려한다면 고차원의 문제를 차원 문제없이 해결할 수 있다.

3. 자료의 검토 및 분석

3-1 적용 영역의 선정

개발된 IDP에 의한 홍수조절모형을 실제유역에 적용하기 위하여 북한강 수계를 선택하였고, 대상댐으로는 홍수조절 능력이 있는 화천댐과 소양강댐을 고려하였다. 해당 유역도는 그림 1과 같고 유출 모형도는 그림 2이다.

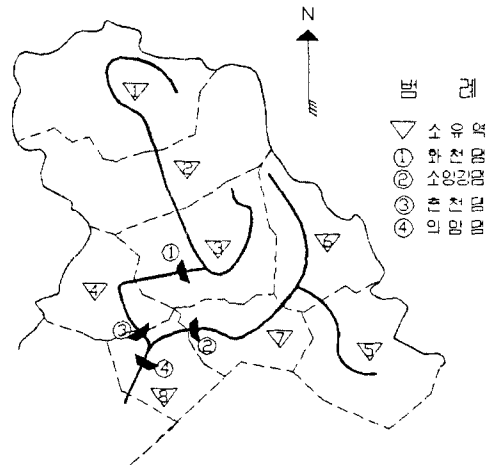


그림1. 해당유역도

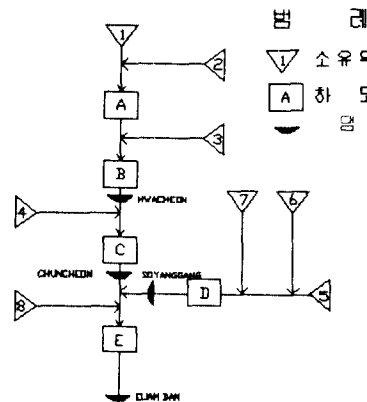


그림2. 유출모형도

3-2 관계 법령의 검토

홍수시 댐 조작에 관련된 법령으로는 재해대책본부 댐 조작기준, 수력발전소 댐 관리규정 및 소양강 다목적 댐 관리규정이 있다(건설부, 1974; 건설부, 1979; 한전, 1983). 이들 법령을 검토하여 최적운영모형에 반영한 내용은 다음과 같다.

3-2-1 댐 하류 유황의 고려

각 댐의 매 시간 방류량을 하류의 유황을 고려하여 설정된 한계방류량 이하로 하도록 한다. 최적운영모형에서는 각 댐의 방류량이 한계방류량을 초과하는 경우 벌칙(Penalty)을 부과하여 방류량을 한계방류량 이하로 되도록 유도하는 방법을 사용하였다.

3-2-2 홍수기간중의 제한수위에 관한 사항

홍수개시전 각 댐의 초기저류량을 제한수위에서의 저류량으로 취하여 홍수조절을 한다. 홍수중기에서의 각 댐 저류량은 2차 홍수(Secondary Flood)에 대비하여 제한수위에서의 저류량이 되도록 하는 제한수위방식을 채택하여 제한수위에서의 저류량으로 하였다.

3-2-3 댐의 안정에 관한 사항

댐의 저류량이 홍수위(화천댐은 만수위)에서의 저류량을 넘지 않도록 하였다.

3-3 각 댐의 방류 특성 및 댐 유입량

3-3-1 각 댐의 방류 특성

각 댐의 저류량에 따른 최대방류능력을 나타내는 식을 지수회귀분석을 사용하여 유도하였다. 각 댐의 수위-저류량-방류량 자료(건설부, 1985)를 사용한 결과는 식(3.1)과 식(3.2)이다.

a. 화천댐의 방류-저류식

(단위:H(m), S(  $\times 10^6 m^3$ ), O(cms))

$$H \leq 173.0, \quad S \leq 679.0 : O = 0.0$$

$$173.0 < H \leq 175.0, \quad 679.0 < S \leq 737.6 \\ : O = 0.6483 \times (S - 679.0)^{1.4575}$$

$$175.0 < H \leq 177.4, \quad 737.5 < S \leq 814.6 \\ : O = 0.0167 \times (S - 679.0)^{2.3577}$$

$$177.4 < H \leq 179.0, \quad 814.6 < S \leq 869.2 \\ : O = 0.2505 \times (S - 679.0)^{1.7994}$$

$$179.0 < H \leq 181.0, \quad 869.2 < S \leq 940.7 \\ : O = 0.7710 \times (S - 679.0)^{1.5857}$$

..... ( 3.1 )

b. 소양강댐의 방류-저류식

$$H \leq 185.5, \quad S \leq 2092.0 : O = 0.0$$

$$185.5 < H \leq 198.0, \quad 2092.0 < S \leq 2872.0 \\ : O = 0.2886 \times (S - 2092.0)^{1.4815}$$

..... ( 3.2 )

3-3-2 댐 유입량

각 댐의 유입량 자료로는 각 댐의 빈도별 홍수수문곡선을 사용하였다. 소양강댐은 기존자료(건설부, 1985)를 사용하였고 화천댐은 POT(Peaks-Over-Threshold) 방법에 의하여 최대유입량에 대한 빈도 해석을 행한 후 소양강댐의 빈도별 홍수수문곡선을 최대유입량의 비로 확대하여 작성한 수문곡선(전경수와 이길성, 1986)을 사용하였다.

3-4 하도 추적 및 지천 유입량

하도추적이 실시되는 하도구간은 화천댐 하류로부터 북한강과 소양강이 합류하는 지점인 의암댐까지로서 춘천댐은 하도로 취급할 수 있는 저수지하도이고 인접 소유역의 지천유입량이 유입한다. 하도추적 방법으로는 선형 전달함수(Linear Transfer Function) 형태인 Muskingum 방법을 사용하였다. 지천 유입량은 해당 유역면적과 화천댐 상류 유역면적과의 면적비에 따라 화천댐 유입량을 축소하여 사용하였다.

4. Incremental DP에 의한 화천댐과 소양강댐의 최적연계운영

4-1 Incremental DP

다음과 같은 일반적인 최적화 문제를 고려한다.

$$\min \sum_{t=1}^T L_t (X_t) \quad \dots \dots \dots ( 4.1 )$$

subject to

$$g_t(X_{t-1}, X_t) \leq 0, \quad t = 1, \dots, T \dots (4.2)$$

$$X_0, X_T \text{ given} \dots (4.3)$$

여기서  $L_t$ 와  $g_t$ 는 Convex Function이다.

$\hat{\pi} = \{ \hat{X}_0, \dots, \hat{X}_T \}$  를 제약조건식 (4.2)와 (4.3)을 만족하는 State Trajectory라 가정하고  $V(\hat{\pi})$ 를 이 State Trajectory의 비용이라 가정하면

다음과 같은 관계를 얻는다.

$$V(\hat{\pi}) = \sum_{t=1}^T L_t(\hat{X}_t) \dots (4.4)$$

만약  $\hat{\pi}$  와 인접한 다른 State Trajectory들의 비용이  $\hat{\pi}$ 의 비용보다 크다면  $\hat{\pi}$ 는 최적해 (Optimal Solution)라 할 수 있다. 즉 제약조건식 (4.2)와

(4.3)을 만족하는 임의의  $\pi$  ( $\pi \neq \hat{\pi}$ ) 에 대하여

$$V(\pi) > V(\hat{\pi}), \quad \|\pi - \hat{\pi}\| < \Delta$$

를 만족하는 실수  $\Delta$ 가 존재하면  $\hat{\pi}$ 를 최적해라 부른다. 초기조건  $X_{t-1}$ 이 주어지고 단계 (Stage)t에서부터 단계 T까지 최적해가 얻어졌다고 가정 하고 비용을  $F_t(X_{t-1})$

(Optimal Value Function)로 하자.  $\hat{\pi}$ 가 최적해인가를 검증하는 한 방법으로서 다음과 같은 Bellman의 순환방정식(Recursive Equation)을 모든  $\epsilon \in (0, \Delta)$  값과 t에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$F_t(\hat{X}_{t-1} + \epsilon) = \min_{X_t} [L_t(X_t) + F_{t+1}(\hat{X}_t) : g_t(\hat{X}_{t-1} + \epsilon, X_t) \leq 0] \dots (4.5)$$

그러나 절대값  $\Delta$  보다 작은 모든  $\epsilon$  값에 대하여 순환방정식을 푼다는 것은 매우 지루하고 비경제적이다. 이와같은 난점을 극복하고 보다 빠르게 최적해에 수렴시키기 위한 방법으로서 Incremental DP가 제안되었다. 미리 결정된  $\alpha$  값을 사용하여  $\hat{X}_{t-1} - \alpha, \hat{X}_{t-1}, \hat{X}_{t-1} + \alpha$ 의 3개 state 만을 고려한

다. 이와 같은 방법으로 단계 t의 시작점에서 3개, 끝점에서 3개를 취하면 9개의 가능한 상태변환이 구성되어질 수 있다(그림 3). 또한 제약 조건식 (4.2), (4.3)은 상태변환을 제약하고 있기 때문에 상기 9개의 상태변환이 전부 가능한 것이 될 수 없으므로 고려대상 갯수를 줄여준다. 이와 같은 이론을 토대로 Incremental DP알고리즘을 적용하여 문제를 해결하는 순서는 그림 4와 같다. 일반적으로 Incremental DP를 적용함에 있어 문제가 되는점은 다음으로 요약된다.

- a. 증분  $\alpha$  값의 설정문제
- b. 초기해 (Initial Trajectory) 설정 문제
- c. 최적값 (Global Optimum)에 대한 수렴성 문제 (Convergence)
- d. 계산시간이 많이 소요된다는 점등이다.

증분  $\alpha$  값과 Initial Trajectory는 계산시간에 많은 영향을 미친다.  $\alpha$  값을 크게 설정하면 계산시간은 줄일 수 있으나 최적해에 수렴하지 못하는 경우가

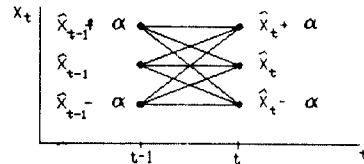


그림3. 가능 상태변환

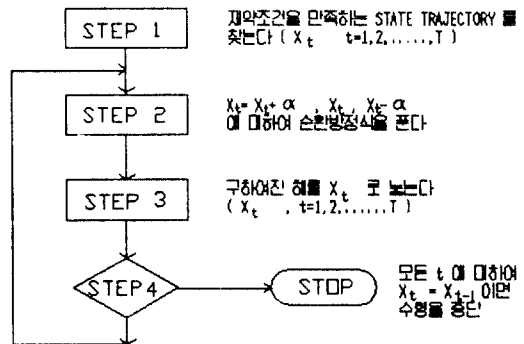


그림4. IDP Algorithm

발생할 수 있고(Turgeon, 1982), 너무 작게 취하면 계산시간이 엄청나게 많이 소요된다. 따라서 정확도(Accuracy)와 계산시간에 따른  $\alpha$  값의 Trade-off가 요구된다. 초기해(Initial Trajectory)는 상태변수의 가능영역(Feasible Region)내, 즉 상태변수가 취할 수 있는 상한치와 하한치 사이에 있도록 하면 된다. 그러나 이 초기해에 따라 계산시간의 차가 많이 생기는 어려움이 따른다. 최적해에 대한 수렴성의 문제는 앞에서 언급한  $\alpha$  값뿐만 아니라 초기해에도 크게 의존한다. 초기해의 양부(Good or Bad)에 따라  $\alpha$  값을 고정시키고 수행하였을 경우 최적해를 찾을 수 있는 확률이 변화한다고 하는 것이 지적되었다(Trott and Yeh, 1973). 상기 단점에도 불구하고 IDP가 최적화 문제에 널리 사용되는 이유는 계산기의 기억용량을 상당히 줄여 주기 때문이다.

4-2 목적 함수(Objective Function)

저수지 조작을 통한 홍수조절은 급격하게 상류 유역에서 들어오는 유입량을 저수지 하류유역으로 시간을 지체시키고, 첨두유량의 크기를 감소시켜 방류하여 하류유역의 피해를 줄이는데 그 목적을 두고 있다. 따라서 저수지의 홍수조절용량을 최대한 활용하여 가능한 한 방류량을 줄이는 것이 요구 된다. 단일댐의 경우는 주어진 홍수조절용량하에서 댐으로부터의 방류량을 최소화시킴으로써 하류유역의 수위를 감소시킬 수 있다. 그러나 댐이 균을 형성하고 있는 경우는 각 댐이 유기적인 연관하에 방류를 시행하여야만 한다. 더불어 합류점까지의 하도추적과 지천유입량을 고려해야만 치수기능을 충분히 다 할 수 있다. 대상유역에 대한 시스템 구성도는 그림 5이다. 목적함수는 각 댐의 방류량이 만나는 합류점 유량을 최소화하는 것으로 설정하였다. 각 댐의 여러 방류계열중 합류점의 최대유량을 최소화하는 방류계열을 도출하는 것으로서 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Min} \{ \text{Max} \{ Q(t) \} \} \dots \dots \dots (4.6)$$

$U(t)$  : 2차원 벡터,  $U^T(t) = ( U_1(t), U_2(t) )$

$U_1(t), U_2(t)$  : 각 댐의 방류량

$Q(t)$  : 합류점 유량

$t = 1, \dots, T$

또한 댐 하류하도의 유황을 고려하기 위하여 각 댐의 방류량이 한계방류량을 초과하는 경우 벌칙을 부과하여 가능한 한 한계방류량 이하가 되도록 하였다. 최종적으로 최적알고리즘에서 사용된 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min}_{U(t)} \{ \text{Max} \{ Q(t) + \text{Penalty} \} \} \dots \dots \dots (4.7)$$

$$\text{Penalty} = \sum_{i=1}^2 100.0 \times (U_i(t) - U_{i,c})^2$$

$U_{1,c}$  : 한계방류량(화천댐:  $U_{1,c}=3000\text{cms}$ , 소양강댐:  $U_{2,c}=3600\text{cms}$ )

4-3 용어의 정의

- a. 단계(Stage),  $t$  : 한 시간 간격을 가진  $t$ 번째 기간 끝에서의 시각 ( $t = 1, \dots, T$ )
- b. 상태변수(State Variable),  $X(t)$  : 단계  $t$ 에서의 각 댐 저류량( $\text{m}^3$ ), 2차원 벡터  $X^T = (X_1, \dots, X_2, \dots)$

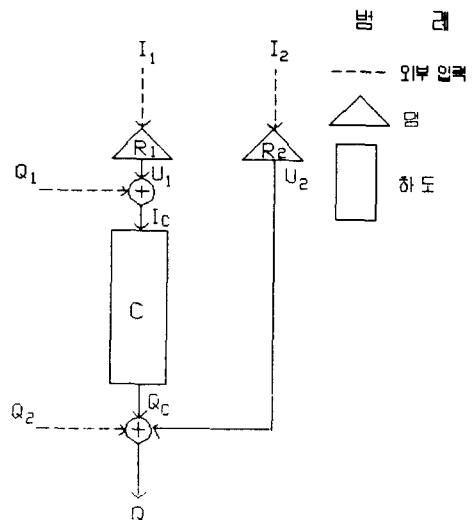


그림5. 대상유역 시스템 구성도

c. 결정변수(Decision Variable),  $U(t)$ : 단계  $t$ 에서의 각 댐 방류량( $m^3/s$ ), 2차원 벡터  $U^T = (U_{1,t}, U_{2,t})$

d. 이득함수(Return Function),  $r_t(X_t, U_t)$ : 단계  $t$ 에서의 합류점 유량.

$$r_t(X_t, U_t) = r'_{t-1}(X_{t-1}, U_{t-1}) + U_{2,t-1}(X_{2,t-1}) + Q_2(t) + \text{Penalty}$$

$$r'_{t-1}(X_{t-1}, U_{t-1}) = C_0(U_{1,t-1}, X_{1,t-1}) + Q_1(t) + C_1(U_{1,t-1}, X_{1,t-1}) + Q_1(t-1) + C_2 r'_{t-1}(X_{t-1}, U_{t-1}) \dots (4.8)$$

e. 최적치함수(Optimal Value Function)  $f_t(X_t)$ : 단계 0에서  $t$ 까지 여러개의 방류제열에 의하여 파생되는 합류점의 최대유량을 구하고 이를 최소화시킨 값.

4-4 관계식

a. 순환방정식(Recursive Equation)

$$f_t(X_t) = \text{Min} | \text{Max} | r_t(X_t, U_t),$$

$$U(t)$$

$$f_{t-1}(X_{t-1}) | | \dots \dots \dots (4.9)$$

상기 순환방정식으로부터 합류점 유량중 침두유량을 최소화시키는 매시간 각 댐 방류량을 결정할 수 있다.

b. 상태변환식(State Transformation)

상태  $X(t)$ 에서  $X(t+1)$ 로 이동할 경우 이들 사이의 관계는 저수지내의 연속방정식에 의하여 결정된다.

$$X_{t+1} = X_t - U_t \times 0.0036 + I_t \times 0.0036 \dots (4.10)$$

이 식은 Invertible하므로 다음과 같이 변환하여 사용하였다.

$$U_t = (X_t - X_{t+1}) \times 10000 / 36 + I_t \dots (4.11)$$

c. 순환방향(Recurrence Direction)

순환방향은 전방순환(Forward Recurrence)으로써 상기 순환방정식을 풀었다. 전방순환에서는 계산상의 문제때문에 0 단계가 필요하다.

d. 경계조건(Boundary Condition)

각 댐의 홍수조절 시작점과 끝나는 시점에서의 상태변수(저류량) 값을 제한수위에서의 저류량으로 유도하는 Initial-Final State Optimization 문제에 대한 경계값을 다음과 같이 정하였다.

$f_0(X_0) = -1.0 \times 10^{30}$ : 단계 0에서의 최적치 함수값

$X_{1,0} = X_{1,T} = 737.6 \times 10^6$ : 화천댐의 초기및 종기저류량( $m^3$ )

$X_{2,0} = X_{2,T} = 2371.0 \times 10^6$ : 소양강댐의 초기 및 종기저류량( $m^3$ )

4-5 제약조건식

최적운영모형에 사용되는 제약조건식은 다음 사항들을 고려하여 설정하였다.

- a. 각 댐과 저수지의 구조적 특성
- b. 하도특성(한계방류량)
- c. 홍수시 댐 조작에 관련된 법령

상기의 기술 내용을 바탕으로 제약조건식을 정리하면 표 1과 같다.

4-6 알고리즘(Algorithm)

적용 알고리즘은 Incremental DP 프로그램으로 미국 Colorado 주립대의 J. W. Labadie와 J. M. Shafer (1980)에 의하여 개발된 DP 프로그램(CSUDP)을 목적에 맞게 일부 수정하여 사용하였다.

CSUDP는 DP 프로그램으로써 일차원 문제로부터 다차원 문제의 최적화까지 응용이 가능하며 특히 저수지운영의 경우에는 장기운영에 알맞게 구성되어 있다. 이 프로그램은 크게 주 프로그램과 2개의 부 프로그램(DYNPRO, INCDP)으로 구성되어 있다. DYNPRO는 일차원 문제의 최적화에 사용되고 INCDP는 다차원 문제에 사용된다. 여기서는 다차원 문제에 적용되는 INCDP에 대한 개괄을 하여 본다.

- ° 계산기법 : Incremental DP
- ° 순환방향 : Backward만 가능





따라서 최적화가 Forward 방향으로 진행되도록 프로그램을 수정하여 사용 하였다.

d. 상태변환식은 각 댐의 연속방정식으로써 다음과 같다.

$$X(t+1) = X(t) - U(t) + I(t) \dots\dots (4.12)$$

여기서 저류량  $X(t)$ ,  $X(t+1)$  이 결정되면 방류량  $U(t)$ 의 값이 한 개의 값으로 고정되므로 Invertible하게 되어 다음과 같이 변환하여 사용할 수 있다.

$$U(t) = X(t) - X(t+1) + I(t) \dots\dots (4.13)$$

e. 각 댐의 저류량을 차별화할 때 증분값을 서로 다르게 줄 수 있도록 하였다.

#### 4-7. 화천댐과 소양강댐의 연계 운영

각 댐의 빈도별 홍수수문곡선을 유입량자료로 하고 합류점 유량의 최대값을 최소화시키는 목적함수 아래 Incremental DP를 사용하여 화천댐과 소양강댐을 연계운영 하였다. 제약조건으로는 각 댐의 저류량이 최대 저류용량을 초과하지 않도록 하였고 각 댐의 초기 및 종기수위는 제한수위로 하였으며 방류량이 한계방류량을 초과하는 경우 벌칙을 부과하여 가능한 한 한계방류량 이하로 유도하였다. 각 댐의 초기해는 유입량이 침투유량에 이르게 되는 시각까지 점진적으로 증가시켜 최대저류량이 되도록 하였고, 홍수 감쇄기에서는 점진적으로 감소시켜 홍수가 끝나는 시각에서는 제한수위에서의 저류량이 되게 설정하였다. 그림 7과 그림 8은 100년 빈도 홍수에 대한 화천댐 및 소양강댐의 IDP모형의 적용한 결과 예이며, 그림 9는 100년, 200년 빈도 홍수에 대한 각 댐 유입량과 합류점유량을 나타낸 것이다. 합류점의 최대유량을 줄이기 위해서는 각 댐은 유입량이 급격하게 들어올 때에 일시에 많은 방류를 하지않기 위하여 홍수 초기부터 감쇄기까지 큰 변화없이 방류를 고르게 하는 것이 요구된다. 화천댐은 홍수 초기에 댐의 최대 방류능력에 의하여 방류가 결정되고 소양강댐은 여수로의 방류능력이 화천댐에 비하여 크기 때문에 모든 빈도에 걸쳐 방류량의 급격한 변화가 없다. 홍수 감쇄기를 보면 각 댐의 방류량이 유입량보다 큰 것은 홍수종기수위를 제한수위로 하

였기 때문이다.

#### 5. Simulation 및 DP 에 의한 단일댐 운영 결과와의 비교 분석

IDP 모형에 의한 연계운영 결과와 화천댐과 소양강댐에 적용된 Simulation 결과(오영민 과 이길성, 1986)를 비교 검토한다. 비교수단으로는 조절률과 이용률을 사용하였으며 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\text{조절률} = (\text{최대유입량} - \text{최대방류량}) / \text{최대유입량} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\text{이용률} = (\text{최고저수위} - \text{제한수위}) / (\text{홍수위} - \text{제한수위}) \dots\dots\dots (5.2)$$

표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 화천댐의 경우 빈도가 높아짐에 따라 조절률과 이용률이 증가하고 있다. 소양강댐은 빈도에 관계없이 조절률이 거의 비슷함을 알 수 있고 이용률은 빈도가 높아짐에 따라 증가하고 있음을 표 3를 통하여 알 수 있다. 표 4는 Simulation과 IDP 모형에 의하여 계산된 합류점의 침투유량을 각 빈도에 대하여 비교한 것으로서 200년 빈도를 제외하고는 모든 빈도에서 IDP 모형의 값이 큰 것을 알 수 있다. 이는 Simulation에 의한 운영이 홍수 말기에 가능한한 수위를 높게 유지하려는 반면, IDP 모형은 홍수 말기에 수위를 제한수위로 낮추는 제약을 가하였기 때문이다. 따라서 각 댐의 방류량이 Simulation에 의한 방류량 값보다 크게 되고 이로 인하여 조절률과 이용률이 Simulation과 DP 에 의한 방법보다 다소 낮게 나타나고 있다(그림 10, 11). 만약 IDP 모형의 홍수 말기 제약조건을 풀어놓고 홍수조절을 한다면 각댐의 방류량을 상당히 줄여 합류점 유량 역시 상당히 줄일 수 있을 것이다.

#### 6. 결론

홍수시 댐 하류유역의 피해를 줄이기 위하여 합류

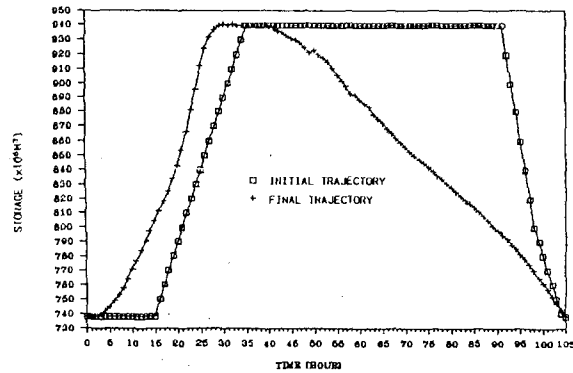
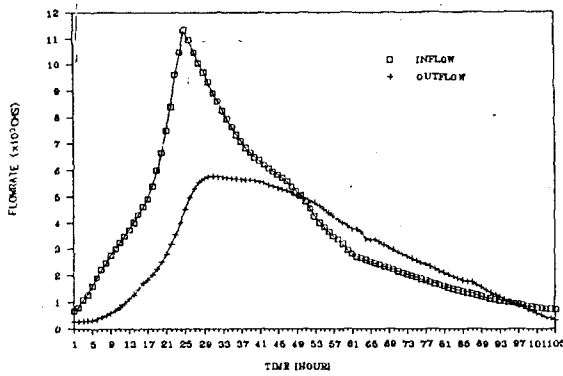


그림7. 화천댐 유입량, 방류량 및 저류량(100년 빈도)

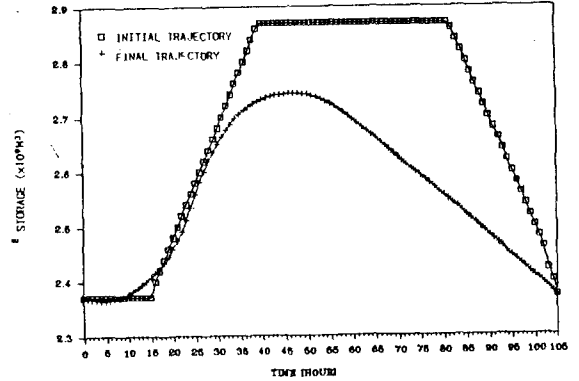
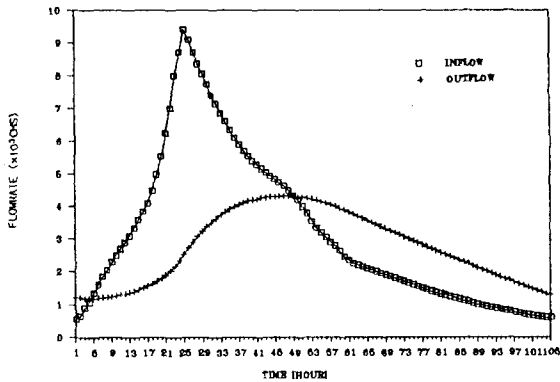


그림8. 소양강댐 유입량, 방류량 및 저류량(100년 빈도)

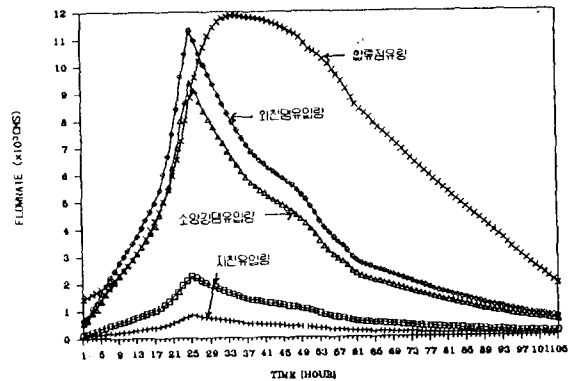


그림9. a) 댐유입량과 합류점 유량(100년도 빈도)

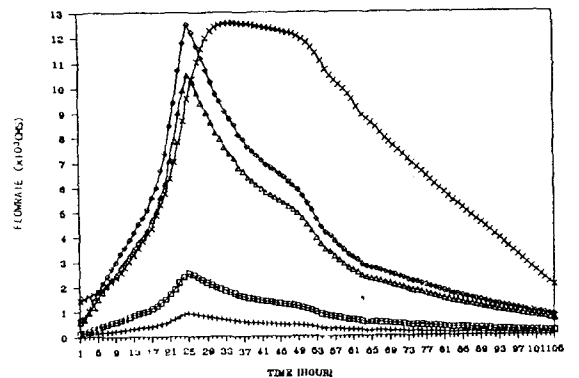


그림9. b) 댐유입량과 합류점 유량(200년도 빈도)

점의 최대유량을 최소화 시키는 목적을 가지고 댐군을 연계운영하는 홍수조절 모형을 개발한 결과는 다음과 같다.

1) 화천댐은 모든 빈도에 걸쳐 최대방류량이 한계방류량을 초과하고 그 유역면적이 큰 반면 홍수조절 용량이 작으므로 한계방류량 이하에서 조절하기 위해서는 예비 방류가 필요하다.

2) 50년 빈도 이상에서 최대방류량이 한계방류량을 초과하고 있으나 홍수 말기의 수위에 관한 제약을 풀어 저수위를 높인다면 한계방류량 이하에서 홍수조절이 가능하다.

표 2 화천댐의 각 빈도별 유입량에 따른 조절률과 이용률(IDP 모형)

빈 도 (yr.)	최대유입량 (cms)	최대방류량 (cms)	최고저수위 (m)	조절률 (%)	이용률 (%)
5	6140	3956	179.59	35.57	67.50
10	7340	4630	180.19	36.92	86.50
25	8910	5476	180.87	38.54	97.80
50	10100	5726	180.98	43.31	99.70
100	11310	5777	181.00	48.92	100.00
200	12500	5872	181.00	53.02	100.00

표 3 소양강댐의 빈도별 유입량에 따른 조절률과 이용률(IDP 모형)

빈 도 (yr.)	최대유입량 (cms)	최대방류량 (cms)	최고저수위 (m)	조절률 (%)	이용률 (%)
5	4100	1897	191.80	53.73	19.48
10	5300	2276	192.70	57.06	31.17
25	6900	2830	193.60	58.99	42.86
50	8200	3670	195.10	55.24	62.34
100	9400	4323	196.10	54.01	75.32
200	10500	4807	196.90	54.22	85.71

표 4 Simulation의 Feedback Control 모형과 IDP 모형에 의한 합류점의 점두유량 비교(단위 cms)

빈 도(yr.)	Simulation		
	Rigid ROM	Tech ROM	
5	5682	5590	6753
10	6755	6842	8171
25	8311	8050	9821
50	9319	8050	11040
100	11525	11282	11855
200	14127	13660	12589

3) IDP 모형은 Computer Memory Requirements 를 상당히 줄여주어 6개의 댐까지 연계운영이 가능하다. 그러나 수렴속도가 늦어 홍수시 실시간 조작 (Real Time Hourly Operation)에 적용하는데는 계산시간이 많이 걸려 어려움이 따른다.

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원해주신 한국과학재단에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 김치홍(1972), Dynamic Programming에 의한 홍수조절, 대한토목학회지, 제20권, 제2호, pp. 9-21.

감사의 글

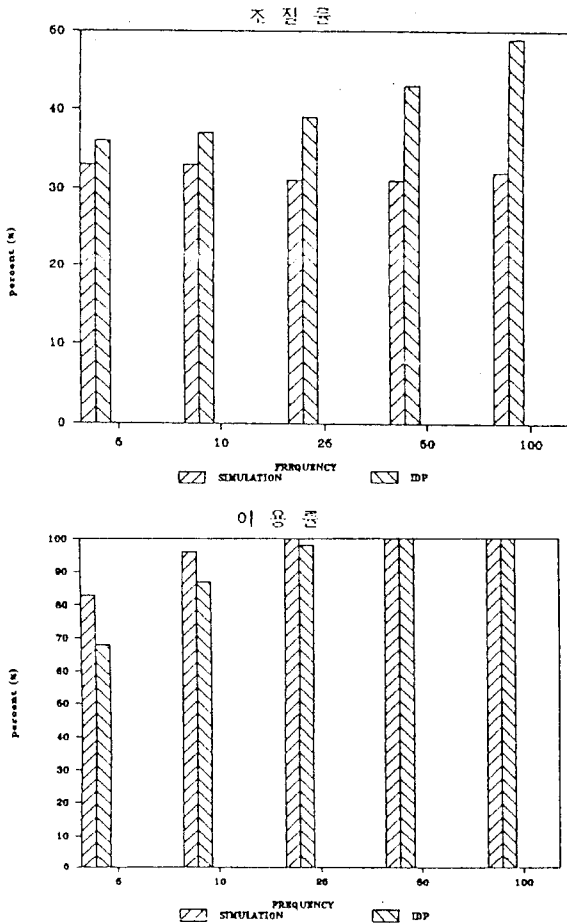


그림10. 화천댐의 조절률과 이용률의 결과비교

2. 오영민, 이길성(1986), Min-Max DP에 의한 소양 및 충주호의 홍수조절, 한국수문학회지, 제19권, 제4호, pp. 339-345.
3. 전경수, 이길성(1986), 홍수시 소양강댐 및 화천댐의 최적 운영을 위한 시뮬레이션, 대한토목학회논문집, 제6권, 제1호, pp. 13-24.
4. 건설부(1974), 소양강 다목적댐 관리규정.
5. 건설부(1979), 중앙재해대책본부 재해대책편람.
6. 건설부(1985), 충주 다목적댐 건설에 따른 한강 홍수 예경보 프로그램개선 보고서, 한강홍수통제소.
7. 한전(1983), 수력발전소댐 관리규정.
8. Heidari, M., V. T. Chow, P. V. Kokotovic, and D. L. Meredith(1971), Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization, WRR, Vol. 7, No. 2, pp. 273-282.
9. Jamieson, D. J., and J. C. Wilkinson(1972), short-term control strategy for multipurpose reservoir systems, WRR, Vol. 8, No. 4, pp. 911-920.

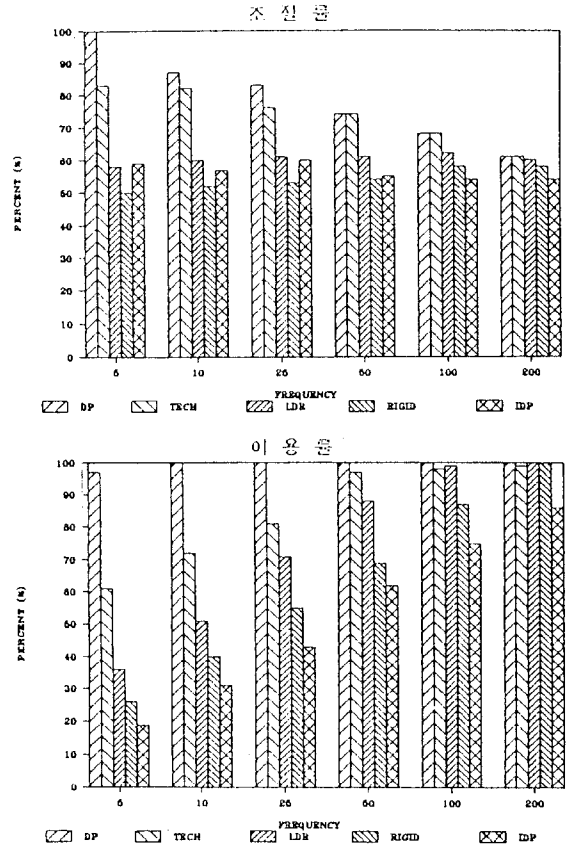


그림11. 소양강댐의 조절률과 이용률의 결과비교

10. JanMrien (1980), Regulation of a flood reservoir with the use of on-line forecasts, IAHS-AISH, pp. 477-483.
11. Labadie, J. W., and J. M. Shafer(1980), Documentation for Program CSUDP-Generalized Dynamic Programming Code, Dept. of Civil Eng. Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
12. Lee, K. S., and D. K. Jeong (1986), Comparative study of multireservoir operations for flood control in the Han river basin, 5th Congress Asian and Pacific Regional Division of IAHR, Proceeding, Vol. 1, Seoul, Korea, pp. 413-431.
13. Shultz, G. A., and E. J. Plate(1976), Developing optimal operation rules for flood protection reservoirs, J. of Hydrology, Vol. 28, pp. 245-265.
14. Trott, W. J., and W. W-G. Yeh(1973), Optimization of multiple reservoir system, ASCE, Vol. 99, No. HY10, pp. 1865-1884.
15. Turgeon, A. (1982), Incremental dynamic programming may yield nonoptimal solutions, WRR,

- Vol. 18, No. 6, pp. 1599-1604.
16. Windsor, J.S. (1973), Optimization model for the operation of flood control, WRR, Vol. 9, No. 5, pp. 1219-1226.
17. Yeh, W. W-G. (1985), Reservoir management and operation models : a state-of-the art review, WRR, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.